CAPÍTULO 2

INSTRUMENTACIÓN

En este capítulo se presentan los aspectos relacionados con la instrumentación. La elección del equipo a utilizar en los trabajos de ingeniería sísmica requiere un conocimiento del espectro de frecuencias de las vibraciones que comprende desde el de las mareas terrestres, con periodos de días, hasta los bajos periodos presentes en los modelos a escala reducida, pasando entre otras por las frecuencias características de los sismos locales, las explosiones y las vibraciones industriales. Asimismo es importante tener en cuenta la amplitud del movimiento del suelo o de la estructura que se quiere medir, para seleccionar el instrumento con ancho de banda y rango dinámico adecuados al tipo de señal que queremos analizar.

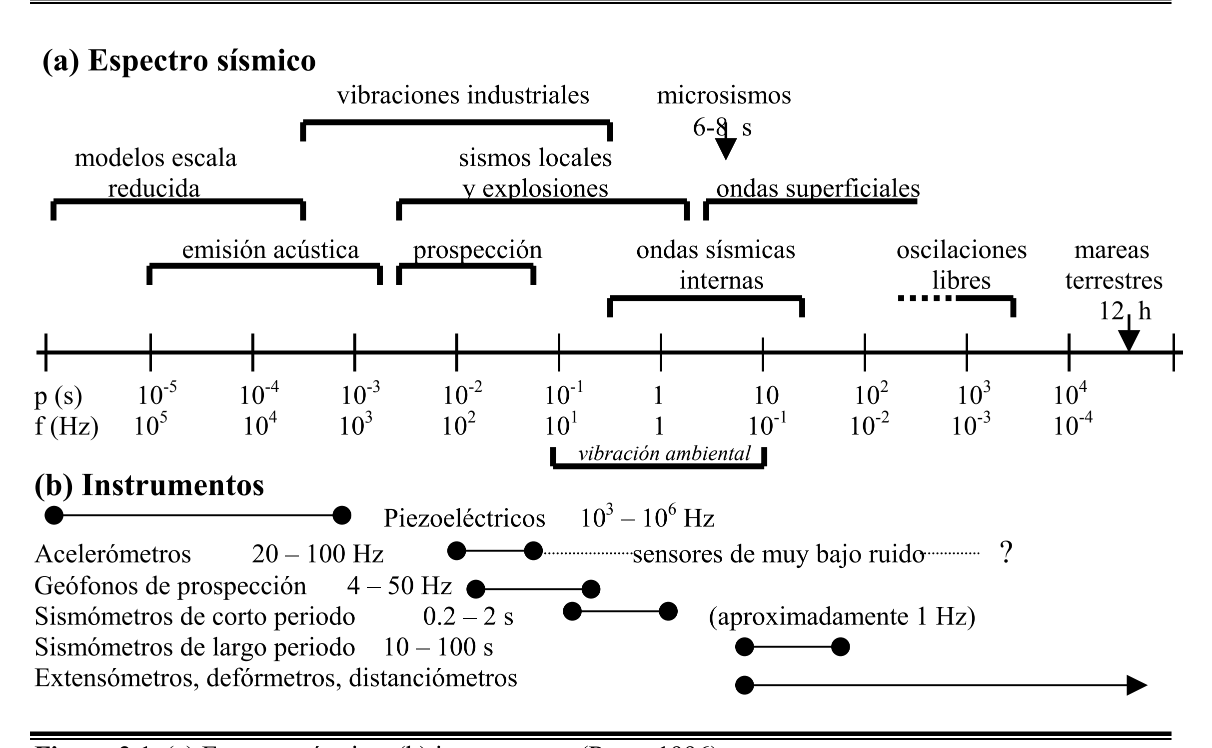


Figura 2.1 (a) Espectro sísmico (b) instrumentos (Roca, 1996).

En la Figura 2.1 se representa esquemáticamente el espectro sísmico, en función del periodo y la frecuencia, señalándose sus fuentes y los instrumentos de medición en cada intervalo. La vibración ambiental se sitúa en el intervalo entre 0.1 y 10 Hz y es la fuente de excitación utilizada en este trabajo para determinar el periodo fundamental de vibración de edificios. Veremos cómo para alcanzar este objetivo es suficiente un registrador de una señal (unicanal) y un sensor de desplazamiento, velocidad o aceleración de una sensibilidad adecuada para medir las pequeñas amplitudes

producidas por la vibración ambiental, aunque de acuerdo con la norma ANSI S2.47-1990 (equivalente a la norma internacional ISO 4866-1990) del American National Standards Institute (1990) y algunos autores como Muriá-Vila y González (1995) es necesario realizar medidas simultáneas para establecer la función de transferencia del edificio por lo cual es indispensable un equipo de al menos dos canales.

Al considerar una señal monocromática *x* en el tiempo *t*, la primera derivada se modifica con un factor *w* (pulsación) y la segunda con w^2, como se observa en las siguientes ecuaciones donde A es la amplitud de la onda.

$$x = A \text{ sen } wt$$
$$v = A\, w \cos wt$$
$$a = A\, w^2 \text{ sen } wt$$

Las señales que se miden en Barcelona corresponden a vibraciones que producen aceleraciones en el intervalo de 10^{-1} a 10^{-4} m/s^2 en edificios de 1 a 20 niveles donde se esperan periodos fundamentales entre 0.2 y 20 Hz.

2.1 EQUIPO UTILIZADO

La mayoría de las mediciones efectuadas en Barcelona se realizaron con un equipo unicanal y en algunos edificios se trabajó con uno multicanal (capaz de recibir más de dos señales simultáneamente). Parte del estudio se realizó en la ciudad de Adra (Almería) donde se usaron el equipo unicanal y un equipo de tres canales cedido por la Universidad de Almería. En el Capítulo 3 se comparan y discuten los resultados obtenidos utilizando equipos uni y multicanal. Esta instrumentación se describe brevemente a continuación.

2.2 EQUIPO DE UN CANAL

2.2.1 Descripción general

Las características del instrumento utilizado en este trabajo fueron tomadas del manual de instrucciones (Instruction Manual 2515, 1989). El instrumento está formado por un Analizador de Vibraciones BRÜEL & KJÆR Tipo 2515 (Figura 2.2) y un acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 8318 (Figura 2.3). El analizador opera con corriente alterna o con baterías y amplifica, filtra, analiza y almacena los datos. Este equipo se compone de un registrador y un procesador de señales, todo contenido en una caja y ha sido diseñado para estudiar problemas de vibración y para control regular de máquinas.

El instrumento puede operar en condiciones muy adversas, características del trabajo diario de campo. Su diseño le permite resistir el polvo y agua y también los golpes y vibraciones que pudiera recibir durante su traslado. La batería del analizador es

recargable, proporciona un mínimo de 3 horas de operación continua y permite un funcionamiento portátil.



Figura 2.2 Fotografía del Analizador de Vibraciones BRÜEL & KJÆR Tipo 2515 utilizado en medición de la aceleración en la parte superior de un edificio.

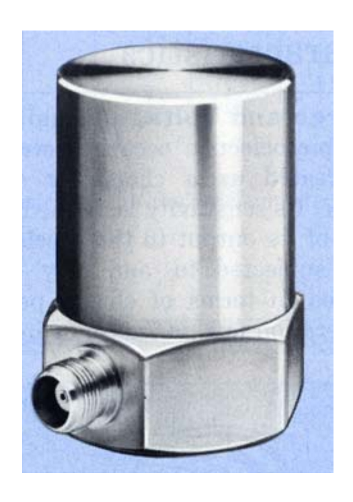


Figura 2.3 Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 8318 (Master Catalogue, 1989).

2.2.2 Modos de operación

Al recibir los datos el analizador los registra como una serie temporal y calcula la transformada de Fourier, es decir, trabaja en los dominios del tiempo y de la frecuencia. En el modo temporal, la señal se puede sincronizar usando un disparador interno o externo, y promediar lo cual mejora sensiblemente la relación señal-ruido y reduce los efectos de otras señales asíncronas. En el modo frecuencial se puede usar una

ventana de Hanning para obtener el espectro de Fourier o una ventana rectangular para obtener la densidad espectral de energía.

El rango dinámico es de 60 dB con un intervalo de medición de 120 dB para cualquier sensibilidad de acelerómetro.

La escala de tiempo es de 62.5 ms a 12.5 s en 8 intervalos y se muestra en la pantalla con 255 líneas (1275 cuando se utiliza la función zoom de amplificación). La escala de frecuencia, en modo de aceleración, varía desde 0.3 Hz (con un filtro de 20dB por octava) hasta 20 kHz, con una respuesta lineal y con atenuación de 20 dB o sea 10 veces menor, entre 0.15 y 0.3 Hz. También dispone de 8 intervalos seleccionables en frecuencia.

Para el presente estudio se ha utilizado un intervalo de muestreo de 2.5 milisegundos, que corresponde a 5000 muestras en 12.5 segundos. En el dominio frecuencial se ha trabajado, en modo de aceleración, en el rango comprendido entre 0 y 20 Hz con intervalos de 80 mHz.

El acelerómetro transmite una señal eléctrica que es procesada por el analizador de vibraciones, visualizándose el resultado en una pantalla de 12.7 cm. Tanto el espectro como la serie temporal pueden guardarse en memoria. Posteriormente, el contenido almacenado se puede transferir a un ordenador para su impresión en papel o para su procesado.

El aparato consta de un preamplificador para conexión directa al acelerómetro y para integrar la señal y dispone de 50 memorias, no volátiles, pudiendo promediar hasta 2000 espectros o funciones temporales.

Al asegurarse la toma de registros fiables sin la necesidad de interrumpir el trabajo para procesar los datos en el laboratorio, se reduce el tiempo de trabajo de campo y se obtienen los periodos dominantes de forma inmediata en los lugares donde se efectúa la medición. De esta manera el planteamiento y selección de sitios para toma de registros se puede hacer en campo reduciéndose el tiempo total del levantamiento de los periodos predominantes de la estructura.

2.2.3 Principales características y usos de los equipos utilizados

Describimos en este apartado las características más relevantes del equipo monocanal empleado.

CARACTERÍSTICAS:

- Batería recargable con fuente de alimentación. El uso de la fuente de alimentación prolonga la vida útil de las baterías al no utilizarse simultáneamente.
- Construcción robusta con protección a la entrada de agua, polvo y frente a vibración y golpes.

- Incluye un preamplificador para conexión directa de acelerómetros e integración de registros de vibración. Suministro de corriente de excitación y voltaje de entrada para grabar señales.
- 60 dB de rango dinámico con 120 dB de rango promedio para cualquier sensibilidad de acelerómetro. Calibración de entrada en escalones de 10 dB para facilitar el uso con acelerómetros *"Uni-Gain B & K*".
- Rango frecuencial en modo de aceleración de 0.3 Hz – 20 kHz (filtro de 20 dB por octava) en respuesta lineal y con atenuación de 20 dB de 0.15 a 0.3 Hz. Rango frecuencial a escoger en 8 escalas.
- Fácil manejo.
- Análisis en 255 líneas (*baseband*) o 1275 líneas (*zoom*) en los dominios temporal y frecuencial.
- Memoria no volátil donde se almacenan hasta 100 espectros, con sus respectivos análisis, valor del cursor y número de promedios.
- Posibilidad de comparación (incluyendo la diferencia) entre el espectro almacenado y el instantáneo.
- Ancho de banda constante, más el 23% y 6% constante del porcentaje del análisis de la banda base.
- Expresión de las unidades en los ejes X e Y.
- Variedad de cursores auxiliares: cursor de armónicos, cursor de lectura de fase, diferenciación e integración de las lecturas del cursor.
- Valores del cursor y medidas de los parámetros expresados en unidades de uso común en ingeniería.
- Características avanzadas de disparo incluyendo fuente de alimentación para disparos externos usando células fotoeléctricas BRÜEL & KJÆR.
- Ayuda en problemas de disparo incluyendo zoom no destructivo, promedio lineal y exponencial, tiempo promedio y análisis cepstrum.
- Posibilidad de muestreo externo.
- Ajuste automático y manual del contraste de la pantalla en función de la iluminación ambiental.
- Interfaz digital Bus IEEE-488 para conexión con otros instrumentos.
- Salida de datos en forma analógica y en vídeo.

USOS:

- Análisis de la vibración en máquinas y estructuras (barcos, puentes, edificios, etcétera).
- Control de condiciones de máquinas y estructuras.
- Adquisición y almacenamiento de espectros de vibración para su procesado posterior.

2.2.4 Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 8318

El sensor utilizado es un acelerómetro de alta sensibilidad que incorpora un preamplificador. La transmisión de la señal se efectúa modulando la corriente, modo que permite distancias de cable de hasta un kilómetro. Asimismo incorpora un filtro pasa bajas para medición de microvibraciones en grandes estructuras. Tiene una

sensibilidad de 316 μA/ms^{-2}, pesa 470 gramos y opera en el intervalo de frecuencias comprendido entre 0.06 Hz y 1.25 kHz. Su frecuencia de resonancia es de 6.5 kHz y su respuesta es aproximadamente plana entre 0.1 y 1000 Hz (±10%). La principal aplicación de este instrumento es la investigación de vibración de grandes estructuras como edificios, puentes y barcos (Master Catalogue, 1989).

2.2.5 Localización de sensores

Para instalar los acelerómetros se deben utilizar áreas lo más retiradas posible de equipos mecánicos o de personas ya que cualquier movimiento de los sensores con respecto al edificio altera tanto el contenido energético como el espectro de frecuencias de la señal y, por lo tanto puede también distorsionar los resultados.

Cuando, como en este trabajo, se desea medir únicamente el periodo fundamental de los edificios, es conveniente colocar el sensor a dos tercios de la altura del edificio ya que es en ese lugar donde se anula el segundo modo (Figura 2.4). En estudios que involucran los modos superiores de vibración, el lugar recomendable es en el primer tercio de la altura, lugar donde el primer modo no es tan influyente. La localización en planta del sensor debe ser sobre el centro de rotación del edificio (generalmente coincide con el centro geométrico, posición 2, Figura 2.5). Para determinar el periodo rotacional hay que utilizar medidas simultáneas de dos sensores colocados en las posiciones 1 y 2 (Figura 2.6), o en esquinas diagonalmente opuestas.

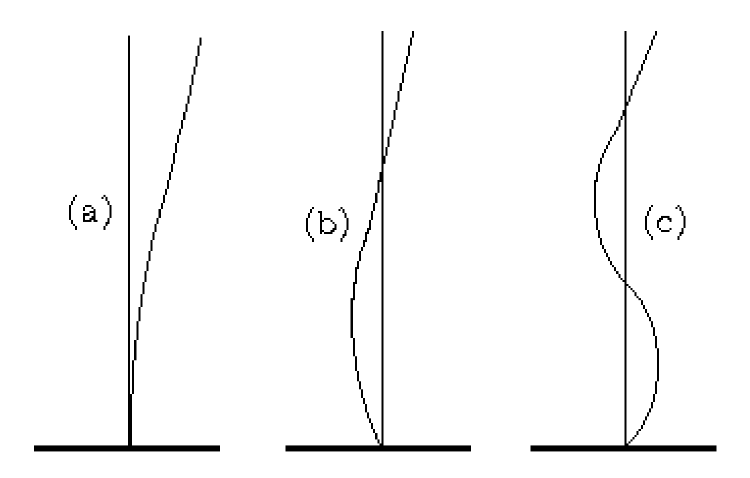


Figura 2.4 Modos de vibración de un edificio, (a) primer modo o fundamental, (b) segundo modo y (c) tercer modo.

En este trabajo el equipo se coloca en la azotea o en el último nivel, cerca del centro geométrico de la estructura y se mide la aceleración en las direcciones longitudinal y transversal al edificio.

Fijando los sensores al edificio se reproduce fielmente su movimiento, sin introducir respuesta adicional relacionada el sistema de fijación sensor-edificio. De

acuerdo con el American National Standard Institute (1990) las abrazaderas deben evitarse siendo preferible utilizar un cubo metálico donde se monten rígidamente los sensores. En circunstancias especiales es aceptable unir el sensor con adhesivos o bases magnéticas.

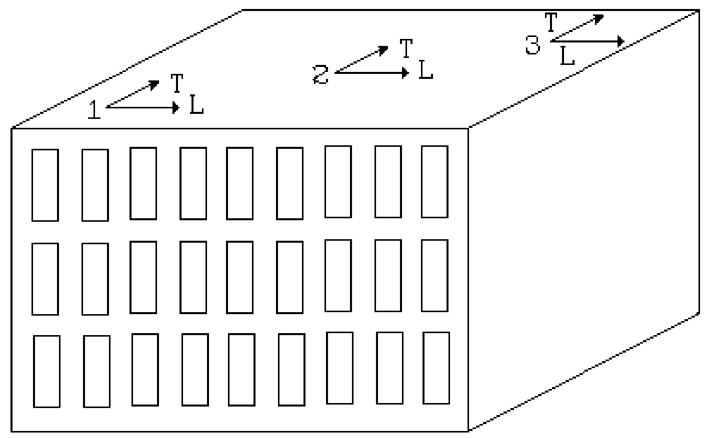


Figura 2.5 Localización de sensores en un edificio para medir las componentes longitudinal y transversal de la señal.

2.3 EQUIPO MULTICANAL

El laboratorio de Geofísica de la Universidad Politécnica de Cataluña cuenta también con un equipo de varios canales que consta de:

- registrador en cinta de vídeo de 14 canales TEAC XR-50.
- analizador de dos canales BRÜEL & KJÆR Tipo 2034.
- acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 4370.
- amplificador de carga BRÜEL & KJÆR Tipo 2635.

2.3.1 Registrador en cinta de vídeo de 14 canales TEAC XR-50

Es un instrumento de 14 canales (Figura 2.6) que usa una cinta de vídeo estándar VHS de media pulgada. Su tamaño es pequeño, su peso ligero, de fácil operación y registro multicanal. Emplea un procesador para el control de todas las fases de operación que incluye revisión de errores operacionales y permite reducción en el consumo de energía.

El equipo fue diseñado para una gran fiabilidad, resistencia a los impactos y versatilidad que puede ser usado en una gran cantidad de aplicaciones en interiores y en el campo. A continuación se describen sus características principales (Operator's Manual):

ESPECIFICACIONES

- Método de registro o reproducción: FM o DR (DR es opcional).

- Cinta: 246 m de largo y 12.7 mm de ancho. Se recomienda la cinta MAXELL T-120HGX(G).
- Número de canales: 14 más uno de memoria. Del 1 al 14 sólo para datos y el 15 para datos o compensación de ruido y control de cinta.
- Cabezales: 15 para registrar y reproducir y una para borrar.
- Controles: manuales; puede operar con control remoto, con excepción del interruptor de potencia (on/off) y el de expulsión de cinta.
- Velocidades de cinta: cuatro velocidades
  1. 7-1/2 pulgadas por segundo (19.05 cm/s)
  2. 3-3/4 pulgadas por segundo (9.52 cm/s)
  3. 1-7/8 pulgadas por segundo (4.76 cm/s)
  4. 15/16 pulgadas por segundo (2.38 cm/s).
- Velocidad de fluctuación de la cinta: Menor que $\pm 0.2\%$.
- Fluctuación (de acuerdo a IRIG 107-73):
  1. Menos de 0.35% a 19.05 cm/s
  2. Menos de 0.45% a 9.52 cm/s
  3. Menos de 0.55% a 4.76 cm/s
  4. Menos de 0.7% a 2.38 cm/s.
- Tiempo de encendido/apagado: aproximadamente 2 segundos.
- Tiempo de avance rápido en ambos sentidos: aproximadamente 5 minutos.
- Tiempo de registro o reproducción continuo: aproximadamente 3 horas a 15/16 pulgadas por segundo.
- Voltaje de entrada: de ± 1 V a ± 10 V, con variación continua.
- Impedancia de entrada: 1 MΩ.
- Voltaje de salida: de 0 a ± 2 V, con variación continua.
- Corriente de salida: ± 10 mA (carga de 20 Ω).
- Ajuste del cero de salida: $\pm 10\%$.
- Visualización de selección de canal: cada canal es mostrado por un LED en el panel frontal.
- Visualización de velocidad de cinta: LED en el panel frontal.
- Contador de cinta: contador lineal electrónico.
- Factor de distorsión: distorsión de armónicos en FM inferior al 1% y distorsión del tercer armónico en DR de 1%.
- Cruce entre canales: bajo nivel de ruido entre canales adyacentes.
- Linealidad: menor que $\pm 0.5\%$.
- Deriva: inferior al 5% después de 30 minutos de funcionamiento.
- Condiciones de operación: temperatura ambiente de 0 ^{o}C a 40 ^{o}C y humedad relativa de 20 a 80%.
- Fuente de alimentación: corriente continua de 11 V a 15 V. A 12 V, aproximadamente 4.5 amperes.
- Peso: aproximadamente 16.5 kg.
- Dimensiones: aproximadamente 38.3 cm de largo por 19.2 cm de ancho y 32 cm de alto.
- Tiempo de registro y respuesta en frecuencia: la Tabla 2.1 presenta las relaciones señal/ruido (S/R) para diferentes modos de operación del equipo.

velocidad de cinta pulgadas/s	Respuesta en +0.5 dB frecuencia -1.0 dB	S/R rms en DB	tiempo de registro aproximado
7-1/2	CD a 5 kHz	50	21 minutos
3-3/4	CD a 2.5 kHz	48	43 minutos
1-7/8	CD a 1.25 kHz	47	1 hora 27 minutos
15/16	CD a 625 kHz	46	2 horas 54 minutos

Tabla 2.1 Algunas características del registrador TEAC XR-50.



Figura 2.6 Fotografía del registrador en cinta de vídeo de 14 canales TEAC XR-50 (izquierda) y del analizador de dos canales BRÜEL & KJÆR Tipo 2034 (derecha).

2.3.2 Analizador de dos canales BRÜEL & KÆJR Tipo 2034

En este apartado se resume la información del analizador de 2 canales (Figura 2.6). El equipo puede medir y mostrar hasta 34 funciones diferentes en los dominios del tiempo y de la frecuencia incluyendo funciones estadísticas. Algunas de estas funciones son la densidad de probabilidad, distribución de probabilidad, espectro instantáneo, autoespectro, espectro cruzado, función de transferencia o respuesta en frecuencia, coherencia, relación señal-ruido, correlación cruzada, autocorrelación y respuesta al impulso entre otras. Todas las funciones están disponibles en tiempo real y se pueden visualizar en el mismo momento de la medición. Pueden presentarse (cuando tengan significado) en términos de la parte real, parte imaginaria, amplitud y fase, gráficas de Nyquist o de Nichols (Instruction Manual 2034, 1983).

La resolución del analizador en el dominio de la frecuencia es de 801 líneas con un intervalo de 1.56 a 25.6 kHz, seleccionable en una secuencia binaria. El intervalo de

frecuencia seleccionado se puede colocar en cualquier parte de las frecuencias de banda base entre 0 y 25.6 kHz. La frecuencia en tiempo real es de 800 Hz cuando opera dos canales y de 1.6 kHz cuando opera con un canal.

2.3.3 Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 4370

Este sensor es un acelerómetro (Figura 2.7) con una sensibilidad de carga de 10 pC/ms^{-2} y de voltaje 8 mV/ms^{-2}. Su frecuencia de resonancia es de 16 kHz y opera en un intervalo de 0.1 a 4800 Hz. Es pequeño, siendo su peso de 54 gramos (Master Catalogue, 1989).

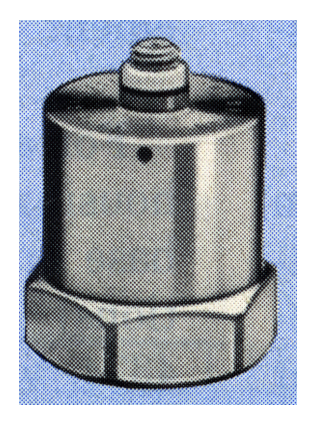


Figura 2.7 Acelerómetro BRÜEL & KJÆR Tipo 4370 (Master Catalogue, 1989).

2.3.4 Amplificador de carga BRÜEL & KJÆR Tipo 2635

Es un instrumento portátil (Figuras 2.8 y 2.9) de bajo ruido, con alimentación a red o independiente a pilas, para usar con acelerómetros u otros transductores piezoeléctricos. Utiliza redes condicionadoras de tres dígitos que permiten introducir la sensibilidad exacta de carga del transductor utilizado para dar relaciones de salida del amplificador entre 0.1 y 1000 mV/unidad, seleccionables en pasos de 10 Db. Incorpora redes activas de integración para la conversión de aceleración de vibración en señales de velocidad y desplazamiento (Manual de Instrucciones, 1982).

2.4 EQUIPO DE TRES CANALES

La Universidad de Almería cuenta con un equipo de tres canales que consiste en tres sensores con respuesta plana en el rango de periodos entre 0.1 y 12 segundos con un sistema de registro basado en una placa de adquisición de señales y un ordenador portátil (Figura 2.10). Esta instrumentación ha sido utilizada para cálculo de periodos fundamentales en edificios de Granada (Kobayashi, et al, 1996) y Almería (Enomoto et al, 1997).



Figura 2.8 Amplificador BRÜEL & KJÆR Tipo 2635 Instruction Manual 2635, 1986).



Figura 2.9 Amplificador, sensores y cables durante una medición de un edificio.

2.5 CONCLUSIÓN

En este estudio se ha visto que en los casos en que se precisa conocer el periodo predominante de un edificio basta con operar con un equipo unicanal situado en la parte más alta del edificio (azotea o último nivel). Este resultado es particularmente importante para proceder a medir de forma masiva periodos fundamentales de edificios situados en grandes ciudades donde no resulta sencillo instrumentar los edificios ni controlar las fuentes de excitación espúreas. El método que se propone es un método expedito y se explica en el próximo capítulo.



Figura 2.10 Equipo de tres canales de la Universidad de Almería.

Para su validación se han efectuado diversas pruebas:

1. Se ha realizado y modelado una estructura a escala reducida que se situó sobre una mesa vibrante y se excitó mediante diferentes acciones. Para su estudio empírico, se utilizó el equipo multicanal y el analizador de dos canales para contrastar los métodos de obtención de la función de transferencia y del periodo fundamental.
2. Se ha realizado un estudio de un edificio singular de la ciudad de Barcelona: la Torre Mapfre. Se efectuó el modelado de su periodo fundamental y se obtuvieron registros de ruido usando técnicas multicanal para hallar su función de transferencia.
3. Se efectuó un estudio de 22 edificios en la ciudad de Adra utilizando el equipo de 3 canales de la Universidad de Almería y el monocanal del Laboratorio de Geofísica. Este estudió permitió comparar los resultados obtenidos usando las técnicas multicanal y las medidas de ruido en la parte más alta de los edificios.

En las mediciones de los edificios de la ciudad de Barcelona para obtener fórmulas empíricas específicas de la ciudad se ha usado el equipo monocanal.